



РОСЭНЕРГОАТОМ
**БАЛАКОВСКАЯ
АЭС**

Эксплуатация энергоблоков Балаковской АЭС с использованием 18-ти месячного топливного цикла

*В.Н. Бессонов
Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом»
«Балаковская атомная станция»*

www.rosenergoatom.ru

История вопроса. Концепция программы модернизации действующих АЭС на период 2007 – 2012 годы



В период до 2006гг. на российских АЭС был выполнен значительный объем работ по модернизации и техническому перевооружению, повышению эффективности работы.

Для дальнейшего повышения эффективности модернизации действующих АЭС необходимо было использовать положительный опыт мировой атомной энергетики.

Основные пути и способы повышения эффективности АЭС, реализованные в мировой практике:

- *Повышение КИУМ за счет увеличения межремонтного периода*, снижения длительности ремонта и контроля состояния оборудования (в 90-х годах были реализованы мероприятия, направленные на повышение КИУМ за счет перехода на 18-ти и 24-х месячные топливные циклы)
- Повышение установленной мощности энергоблоков
- Снижение численности ремонтного персонала за счет внедрения специального оборудования и оснастки, а также развития высококвалифицированного сервисного обслуживания
- Повышение надежности оборудования

История вопроса. Работы по обоснованию эксплуатации с увеличенными межремонтными периодами энергоблоков с ВВЭР-1000



2008 год:

- подготовлены и представлены в Ростехнадзор обоснования допустимости увеличения до 18 месяцев периодичности ТОиР и проверок реактора, ГЦН, ГЦТ, ПГ, КД, новый ВАБ-1 (более 100 документов (вновь разработанных и откорректированных ОКБ «Гидропресс», Атомэнергопроект, РНЦ КИ, ВНИИАЭС, Балаковской АЭС))

2009 год:

- в Ростехнадзоре получено разовое разрешение на опытную эксплуатацию блока 1 для 18 топливной кампании с длительностью 15 месяцев (ДНП-1381)

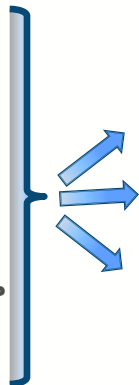
2010-2014 годы:

- Проводится опытная эксплуатация блоков №№1-4 в удлиненных топливных загрузках по отдельным решениям

Объём выполненных обоснований

ОКБ «Гидропресс»

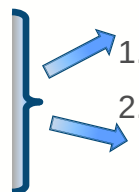
- Реактор
- ГЦТ
- ПГ
- Система компенсации давления
- пассивная часть САОЗ



1. Анализ надёжности на основе статистических данных эксплуатации
2. Анализ надёжности (методами механики разрушения) при изменении периодичности контроля металла и периода между техническими освидетельствованиями
3. Итоговый отчёт по обоснованию допустимости увеличения до 18 месяцев периода между ТОиР и увеличения (с 4 до 6 и более лет) периода между техосвидетельствованиями

ОКБ «Гидропресс»

- ИПУ КД, ИПУ ГЕ САОЗ
- ИПУ ПГ



1. Анализ надёжности ИПУ
2. Обоснование допустимости увеличения периода между проверками работоспособности и ревизии ИПУ

ОАО «ЦКБМ»

- ГЦН



Обоснование возможности увеличения периода между ТОиР до 18 месяцев и возможности увеличения периода технического освидетельствования улиток, корпусов выемных частей, корпусов блоков уплотнений с 4 до 6 и более лет

ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва



- Системы безопасности
- ИПУ реакторного отделения
- ИПУ турбинного отделения
- Вспомогательное оборудование реакторного отделения
- Вспомогательное оборудование турбинного отделения
- Герметичное ограждение РУ



Результаты оценки средних значений частот ПАЗ для внутренних ИС при работе энергоблока на уровне мощности 104% от $N_{ном}$ и в стояночных режимах при эксплуатации в 18-ти и в 12-ти месячным межремонтных циклах.

Межремонтный цикл	Частота ПАЗ-М, 1/год	Частота ПАЗ-С, 1/год	Суммарная частота ПАЗ-1, 1/год
18-месячный,	2,0E-05	1,72E-05	3,7E-05
12-месячный	2,55E-05	2,33E-05	4,88E-05

Из рассмотрения приведенных в таблице результатов можно сделать вывод о том, что переход на 18-ти месячный межремонтный цикл является обоснованным, поскольку приводит к повышению уровня безопасности.

1. Наиболее проблемные ограничения перехода на 18-месячный межремонтный интервал содержатся в ПНАЭ-Г-7-008-89, НП-010-98. Исторический подход: перегрузки и ППР - раз в год. Нормативная база привязана к этим годовым периодам, например:

- В соответствии с требованиями пунктов 6.2.27 и 6.2.28 ПНАЭ Г-7-008-89 проверку функциональной способности и проверки настройки предохранительной арматуры следует проводить не реже одного раза в 12 месяцев.
- В соответствии с требованиями пунктов 8.2.15 и 8.2.16 ПНАЭ Г-7-008-89 допускается отсрочка проведения технического освидетельствования оборудования и трубопроводов... «...не более чем на три месяца...».
- НП-010-98 требует: испытание ГО на герметичность и испытания пассивных элементов ЛСБ – 1 раз в год.
- Кроме того, существует целый ряд требований и ограничений по периодичности проверок и ТОиР оборудования в других нормативных и руководящих документах, а также в документации заводов-изготовителей оборудования.
- Для большей части оборудования важного для безопасности в ТОБ АС предусмотрено проведение 1 раз в год в период проведения плановых ремонтов различных видов ТО, таких как: наружный осмотр, опробование от ключей управления арматуры, насосов, разборка и чистка электродвигателей, замена смазки подшипников и т.д.

2. Недостаточный опыт эксплуатации реакторов ВВЭР-1000 в удлиненных топливных циклах

Действия выполняемые Балаковской АЭС для обеспечения эксплуатации энергоблоков в топливных кампаниях с длительностью до 18 месяцев:

Основные направления:

- Балаковская АЭС совместно с концерном Росэнергоатом участвует в работе по изменению норм и правил
- До корректировки норм и правил временно изменена периодичность СР и КТР на блоках Бал АЭС
- До корректировки норм и правил опытная эксплуатация энергоблоков выполняется по отдельным решениям с предоставлением соответствующих обосновывающих материалов и результатов имеющегося опыта эксплуатации по надежности работы оборудования в удлинённых топливных циклах

Изменены графики ППР энергоблоков с годовых ремонтных циклов К-С-С-С-К на ремонтные циклы по топливным кампаниям К-С-С-К для обеспечения требований действующей нормативно-технической документации по периодичности ремонта, инспекции металла и технического освидетельствования оборудования, в результате чего:

- для оборудования и трубопроводов с установленной периодичностью контроля в 30 тыс. часов (корпус реактора, верхний блок, сварные соединения ГЦТ с патрубками реактора, ТОТ ПГ, трубопроводы компенсации давления, трубопроводы САОЗ и трубопроводы расхолаживания) – **нарушения периодичности по НП не происходит**
- для оборудования и трубопроводов с установленной периодичностью контроля в 45 тыс. часов (парогенераторы, петли ГЦТ, деаэратор, подогреватели низкого давления, подогреватели высокого давления, сепараторы-пароперегреватели, сепараторосборник) – **нарушения периодичности по НП не происходит**

Графики технического освидетельствования и ремонта оборудования составлены с учетом упреждающего технического свидетельства оборудования и трубопроводов.

Разработаны обоснования безопасности, мероприятия, компенсирующие отступления от норм и правил. Мероприятия приводятся в программах опытной эксплуатации.

Для обеспечения возможности эксплуатации энергоблоков Балаковской АЭС в удлинённых межремонтных циклах выполнены и выполняются модернизации на блоках, например:

- С 2006г начато и внедряются ТВС-2М с повышенной жесткостью каркаса
- Внедрена в эксплуатацию система контроля протечек 1-го контура
- Выполнена замена ротора турбогенератора на модернизированный
- Выполнена замена якоря возбuditеля на модернизированный
- Выполнена модернизация насосов ОПВ-10-185ЭГ на БНС-1 с заменой подшипников на другой тип
- Выполнена замена фильтров на системах VB, VC машзала и БНС на самоотмывающиеся фильтры фирмы «Тапрогге»
- Замена бустерных насосов ТПН на насосы с корпусами из нержавеющей стали
- Продолжаются работы по переводу турбины на 6-летний ремонтный цикл
- Внедрен этаноламиновый ВХР 2-го контура
- Внедрены системы диагностики коррозионного состояния трубопроводов АЭС (СДКТ АЭС)

Требования предъявляемые к ядерному топливу при работе в 18-ти месячном топливном цикле

ТВС должны обеспечивать надежную, безопасную и эффективную эксплуатацию энергоблоков в удлиненном топливном цикле за счет:

Геометрической устойчивости каркаса ТВС

Достаточности наличия делящегося ядерного материала для обеспечения длительности топливных кампаний 500-510 эфф. суток

Исключения возможности повреждения ТВС (в том числе за счет: фрейтинг износа, дебриз-коррозии)

Устойчивости материалов оболочек твэлов ТВС к водно-химическому режиму при повышенном содержании борной кислоты в начале кампании

Обеспечения нейтронно-физических характеристик активной зоны удовлетворяющих требованиям ОПБ, ПБЯ

Конкурентной стоимости

С учетом вышеупомянутых требований к ЯТ на Балаковской АЭС в настоящее время проводится (или готовится к внедрению) ряд модернизаций ЯТ улучшающих эксплуатационные характеристики используемых ТВС :

Внедрение ТВС-2М с удлиненным топливным столбом и жестким каркасом

Опытно-промышленная эксплуатация на блоке 4 ТВС-2М с АДФ и ПР (антидебризные фильтры и перемешивающие решетки)

Опытно-промышленная эксплуатация на блоке 2 ТВС-2М с твэлами из новых перспективных циркониевых сплавов имеющих улучшенные характеристики

Планируется опытно-промышленная эксплуатация на блоке 2 ТВС-2М с твэгами, имеющими высотное профилирование поглотителя

Внедрение ТВС-2М с удлиненным топливным столбом и жестким каркасом. Основные отличия ТВС-2М от ТВС-2

- пучок ТВЭЛОВ и ТВЭГОВ удлинен на 113 мм вниз и на 37 мм вверх
- головка и хвостовик укорочены соответственно удлинению пучка ТВЭЛОВ и ТВЭГОВ
- обогащение топлива повышено до 4,95%
- на расстоянии 113 мм над нижней решеткой введена 13 ЦДР, выполняющая роль антивибрационной решетки, а верхняя ЦДР приподнята на 37 мм
- в хвостовике опорные ребра выполнены радиальными
- изменены размеры топливной таблетки

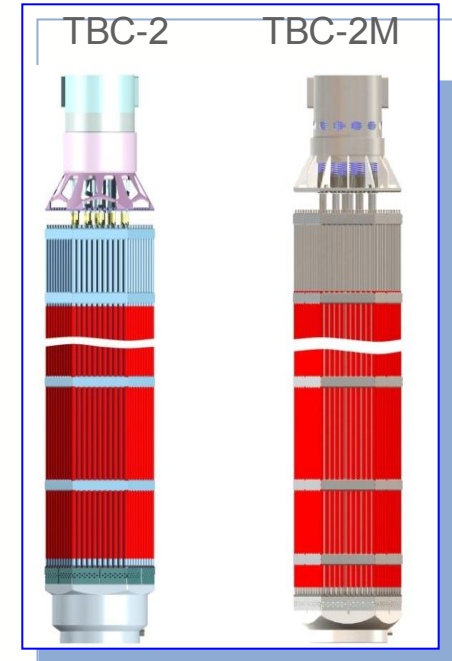
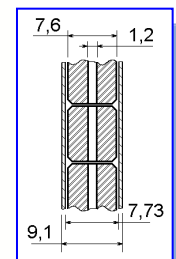
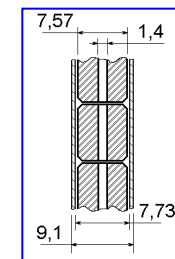


График внедрения ТВС-2М на Балаковской АЭС

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Блок 1								
Блок 2								
Блок 3								
Блок 4								

	- топливный цикл без ТВС-2М
	- топливный цикл с подпиткой ТВС-2М с бланкетами
	- топливный цикл с подпиткой ТВС-2М без бланкетов

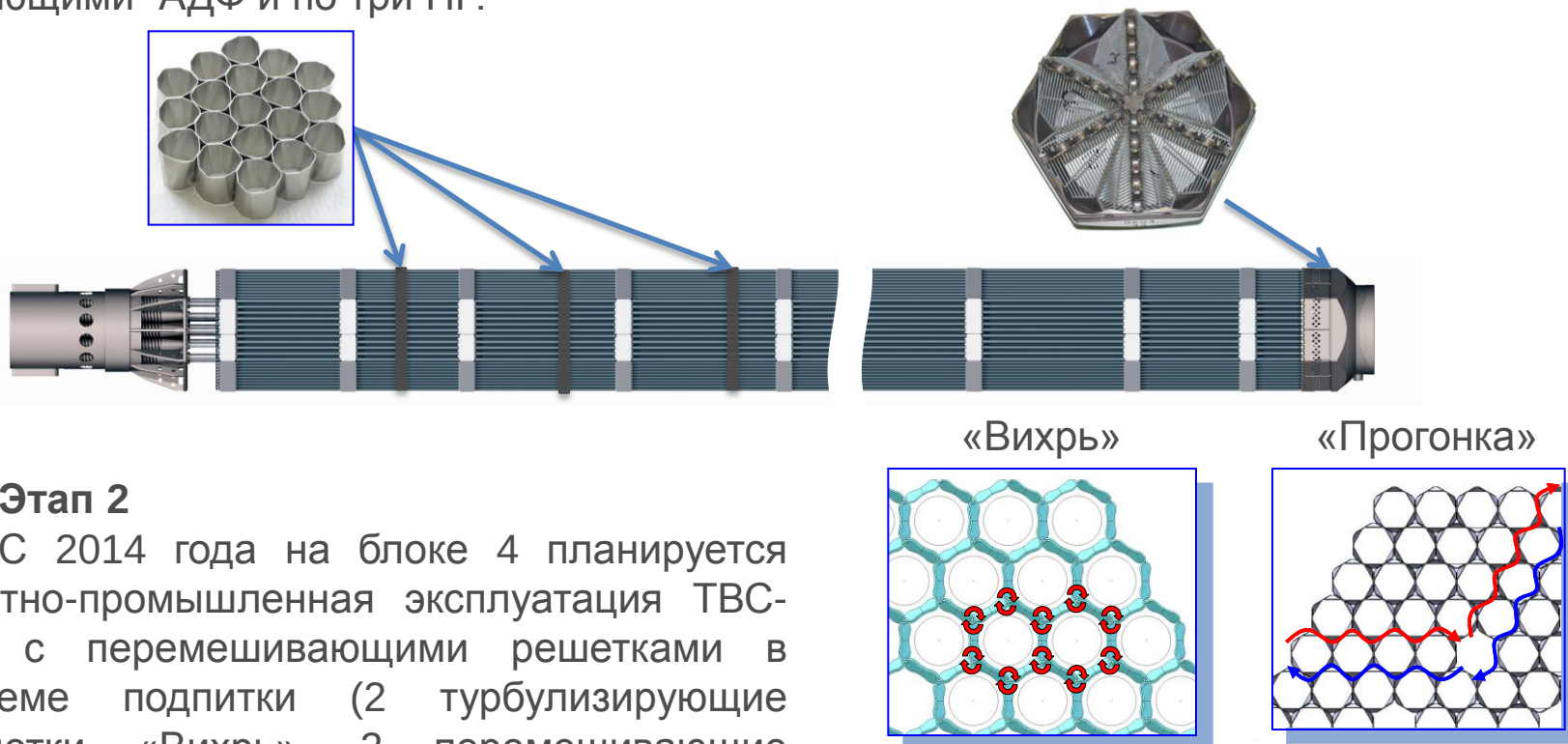


Опытно-промышленная эксплуатация ТВС-2М с АДФ и ПР (антидебризные фильтры и перемешивающие решетки) на блоке 4

Этап 1

В 15 кампанию на блоке 4 установлены на опытно-промышленную эксплуатацию 6 ТВС-2М с АДФ и ПР.

В настоящее время на блоке 4 третью кампанию эксплуатируется три ТВС-2М имеющими АДФ и по три ПР.



Этап 2

С 2014 года на блоке 4 планируется опытно-промышленная эксплуатация ТВС-2М с перемешивающими решетками в объеме подпитки (2 турбулизирующие решетки «Вихрь», 2 перемешивающие решетки «Прогонка»)

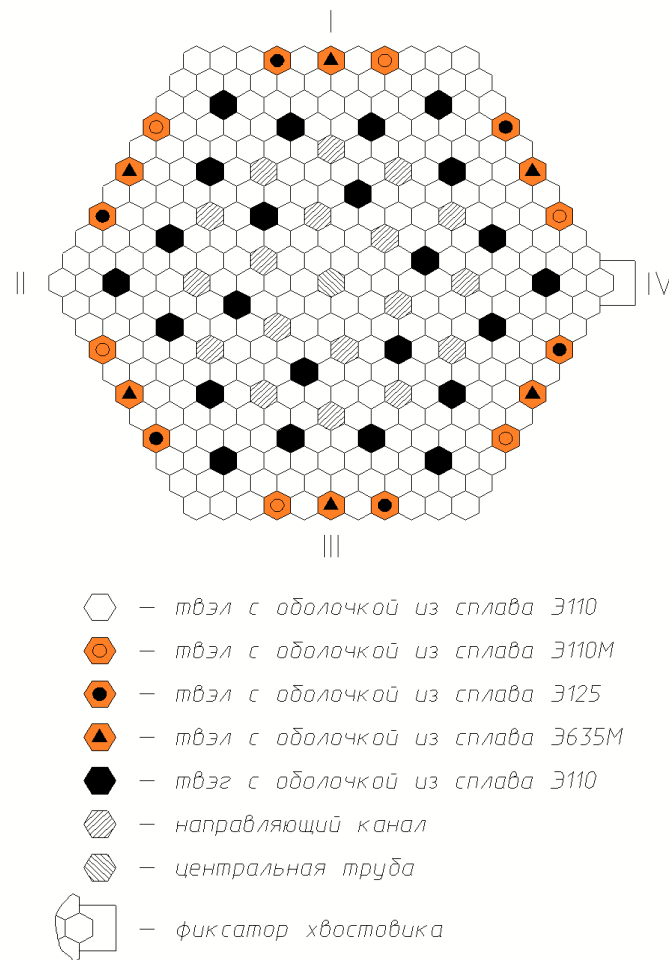
Опытная эксплуатация ТВС-2М с твэлами с оболочками из новых сплавов

На энергоблоке №2 для проведения реакторных испытаний с 2012 года установлены три ТВС-2М, имеющие опытные твэлы с оболочками из сплавов Э110М, Э125 опт. и Э635М

Модифицированные сплавы Э110М, Э125опт, Э635М имеют повышенное сопротивление радиационной ползучести и росту при сохранении коррозионной стойкости



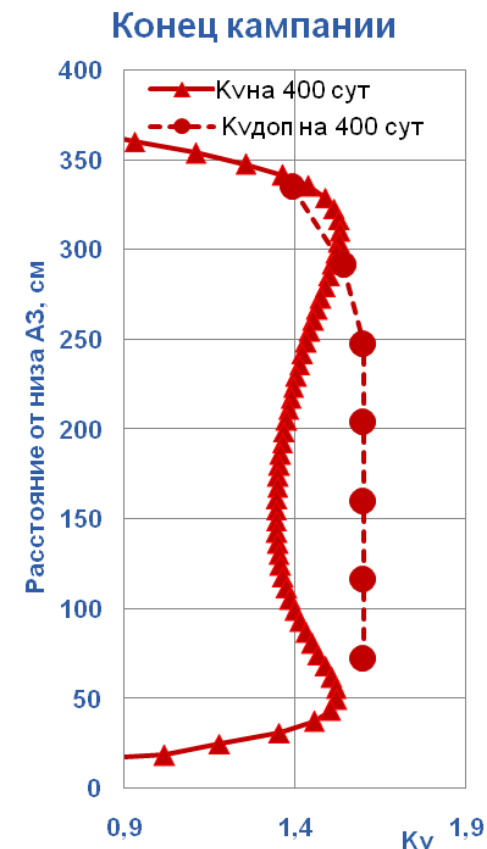
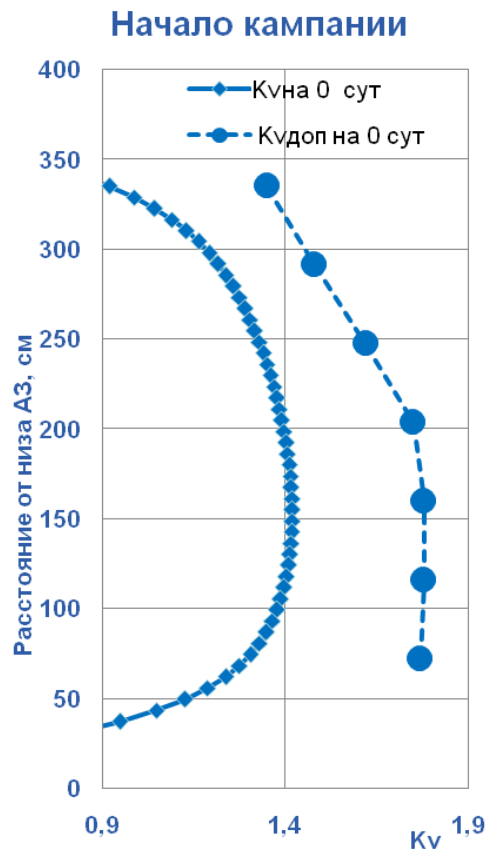
**ОПЫТНЫЕ
ТВЭЛЫ**



Внедрение ТВС-2М с профилированными твэгами. Высотное распределение энерговыделения в ТВС

При некоторых режимах выгорания для спроектированных топливных циклов длительностью до 18 месяцев возможно превышение предельных значений линейного энерговыделения твэл q_l и допустимых коэффициентов неравномерности объемного энерговыделения (K_v доп) в верхней части активной зоны в конце топливной кампании

Одно из возможных решений данной проблемы - высотное профилирование активной зоны



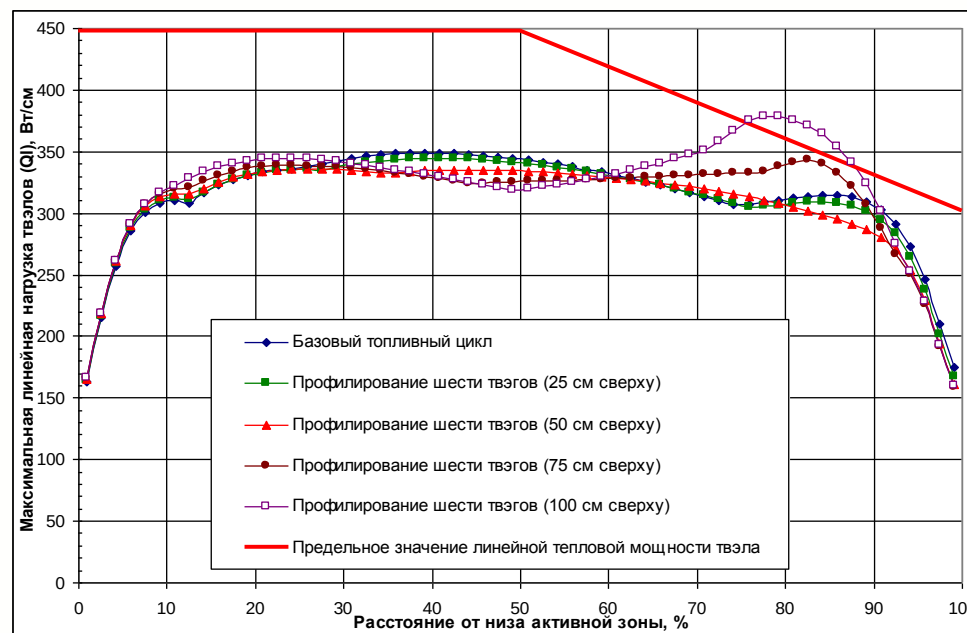
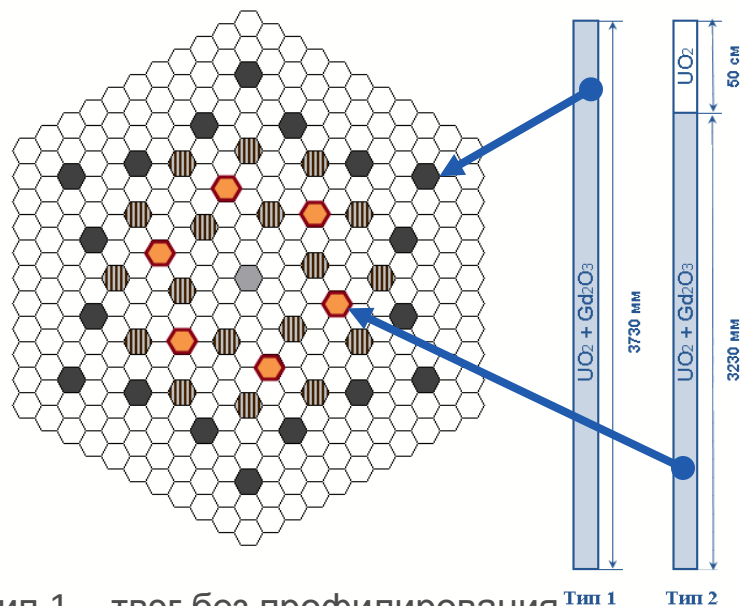
Высотное распределение энерговыделения и допустимое значение энерговыделения в ТВС первого года эксплуатации на начало и конец кампании

Расположение твэгов в ТВС с высотным профилированием

Из всех рассмотренных вариантов профилирования ТВС наилучшим техническим решением по увеличению минимального запаса до ограничения на линейную тепловую нагрузку твэлов признано профилирование выгорающим поглотителем верхней части 6 твэгов на высоте 50 см. **(Вариант А).**

В 2013 году разработано совместное решение ОАО «Концерн Росэнергоатом» и ОАО «ТВЭЛ» «По организации работ по проведению ОПЭ ТВС-2М с профилированными твэгами на блоке 2 Балаковской АЭС» в соответствии с которым, начиная с 22 загрузки (2015г) планируется установка ТВС-2М имеющих высотное профилирование выгорающим поглотителем.

Расположение твэгов в ТВС



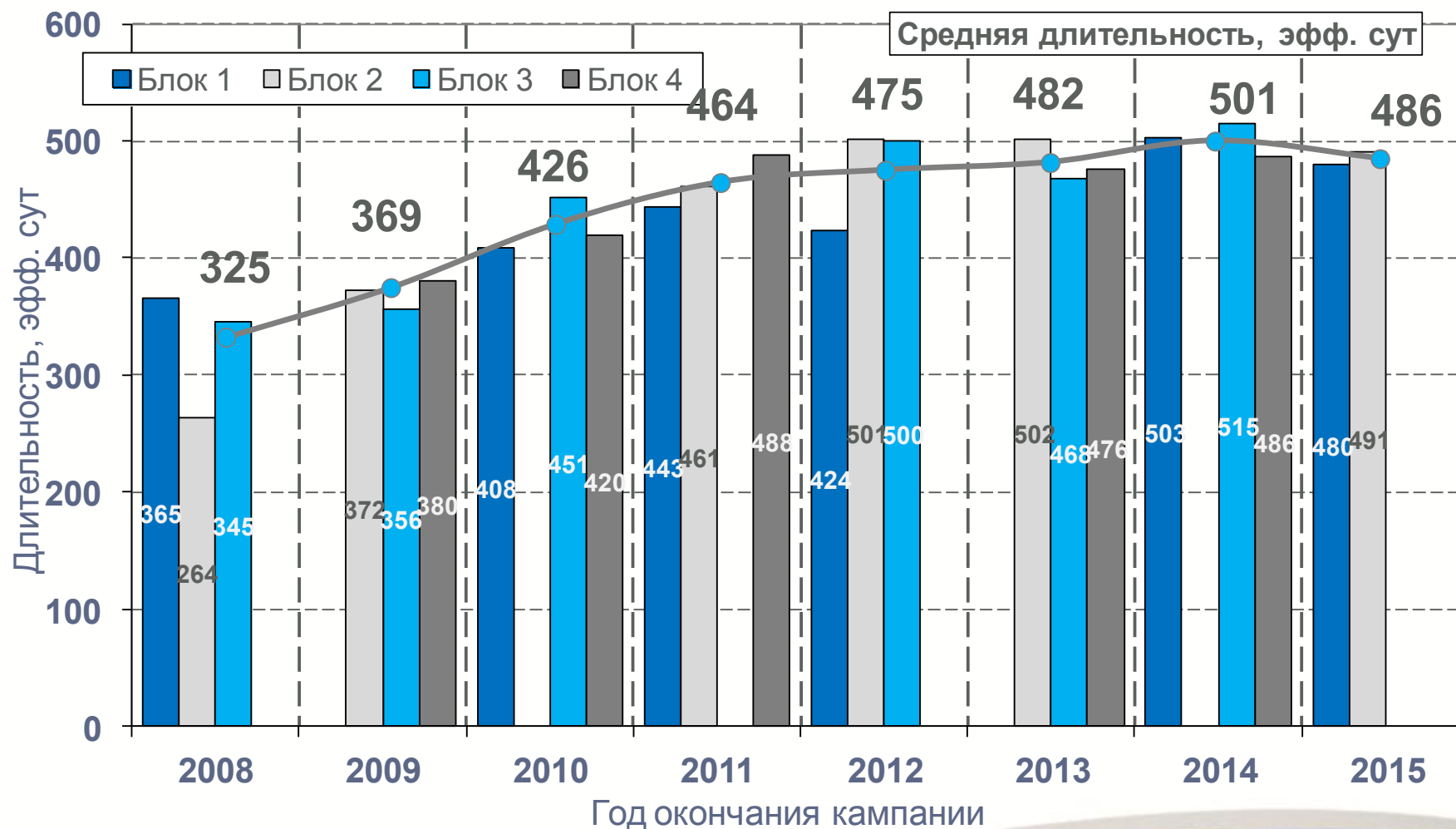
Тип 1 – твэг без профилирования
Тип 2 – твэг с профилированием

Результаты эксплуатации ядерного топлива. Длительности топливных кампаний

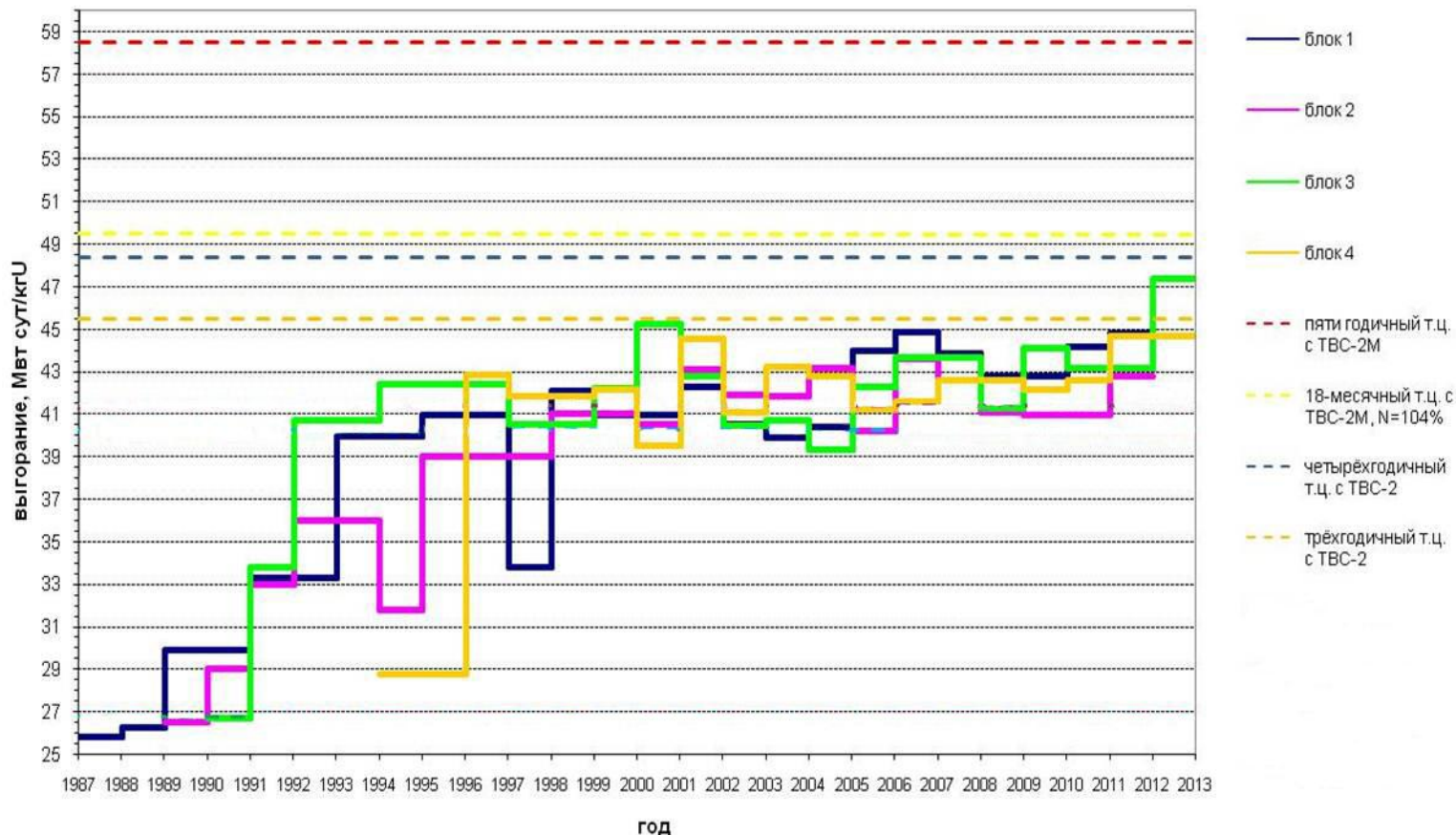
топлива.



РОСЭНЕРГОАТОМ
БАЛАКОВСКАЯ
АЭС



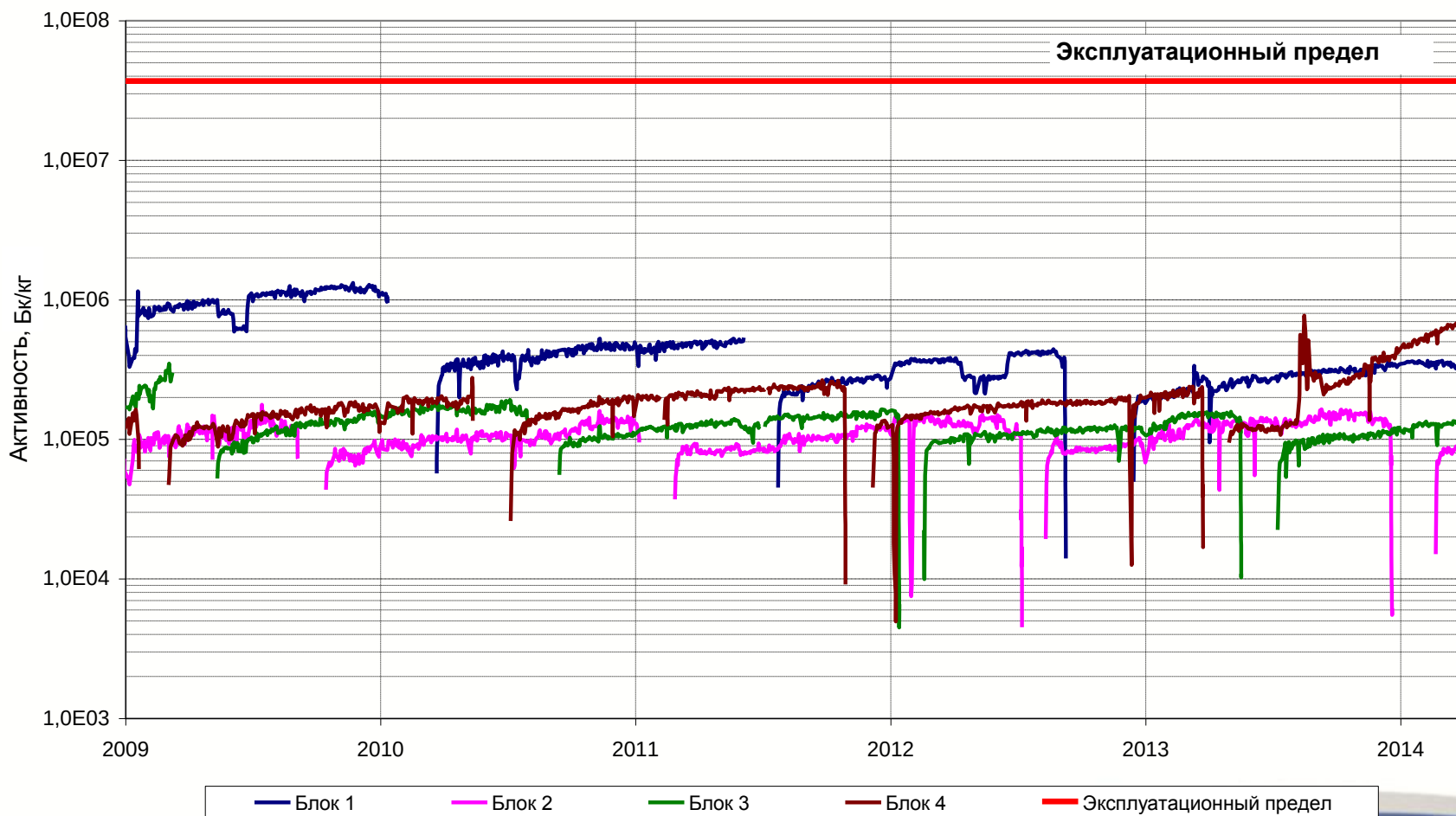
Результаты эксплуатации ядерного топлива. Изменение среднего выгорания выгружаемого топлива



Примечание: приведены данные из Технического отчета. Анализ эффективности топливоиспользования на энергоблоках АЭС с ВВЭР (ВНИИАЭС инв. №О-311-236/13)

Результаты эксплуатации ядерного топлива. Активности радионуклидов йода в теплоносителе 1 контура

Суммарная удельная активность изотопов йода в
теплоносителе первого контура энергоблоков 1,2,3, 4
(приведенная к проектному расходу на анионитные фильтры СВО-2 30т/ч)





При работе энергоблоков Балаковской АЭС в удлиненных топливных циклах наблюдается геометрически стабильное состояние активной зоны, что подтверждается:

- результатами проверок времени падения ОР СУЗ при пуске и останове энергоблоков;
- результатами проверок усилий перемещения ОР СУЗ при пуске, останове энергоблоков и проведении операций ТТО при перегрузке ПС СУЗ и ТВС в реакторе и БВ.

Результаты опытной эксплуатации оборудования АЭС. Усредненное по месяцам количество дефектов оборудования



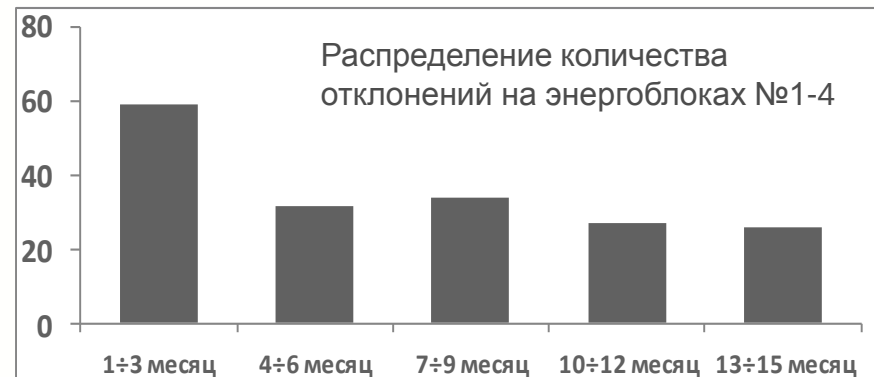
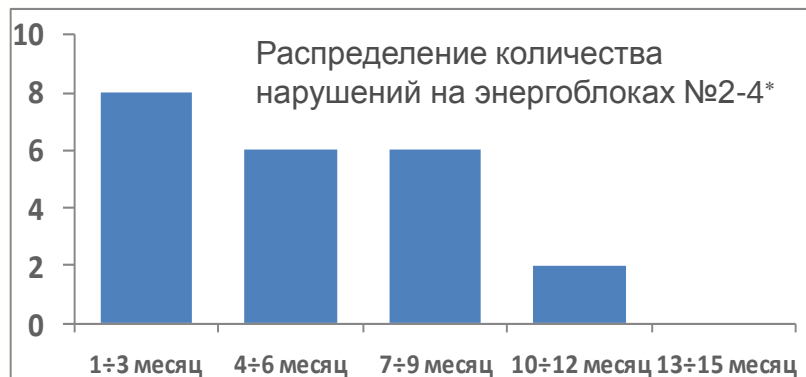
Из представленных диаграмм следует, что увеличение межремонтного цикла не приводит к увеличению числа регистрируемых дефектов оборудования.

В течении 6-8 месяцев происходит снижение и стабилизация количества регистрируемых дефектов оборудования. После восьмого месяца количество регистрируемых дефектов стабилизируется и находится практически на постоянном уровне.

Результаты опытной эксплуатации за последние 5 лет. Количество событий на АЭС

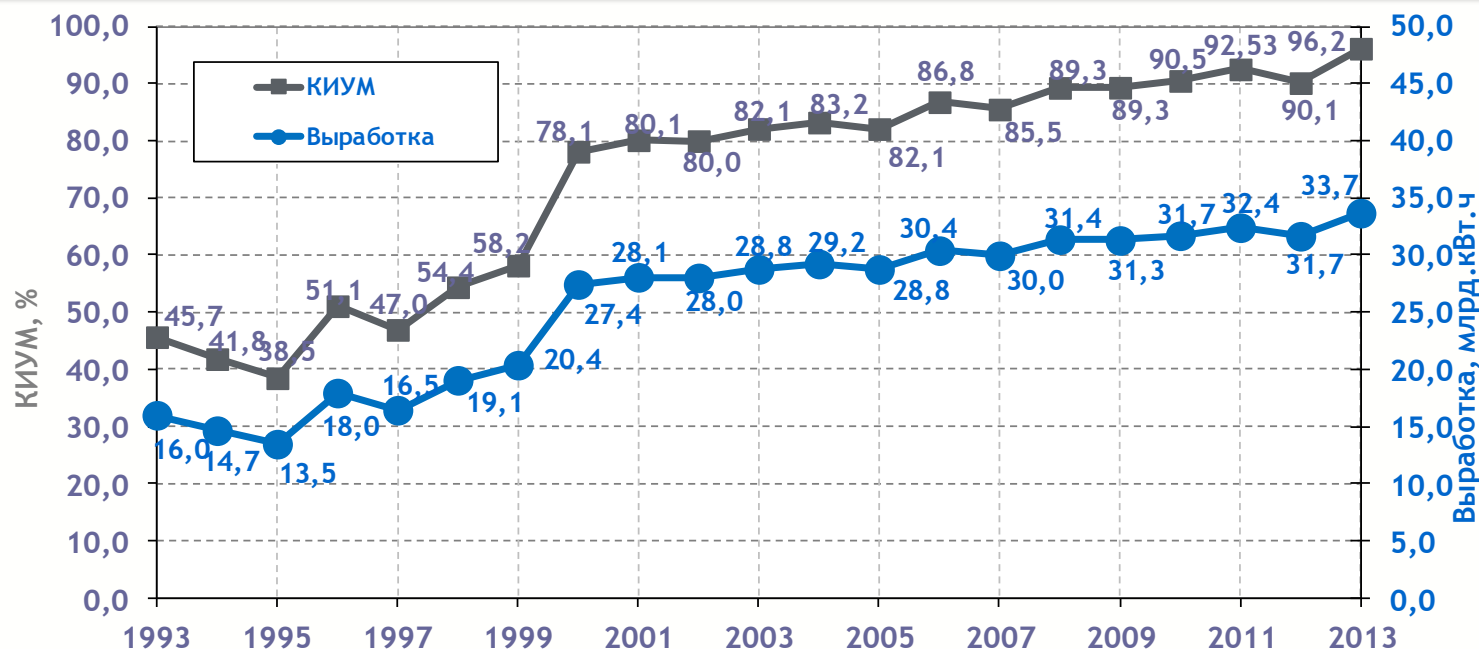


Распределение произошедших событий на энергоблоках АС за пять лет по завершенным топливным компаниям



* Энергоблок №1, в течении четырех топливных компаний (пять лет) отработал без учитываемых нарушений

Результаты эксплуатации Бал АЭС в 2013 году



Выполнение работ по внедрению и совершенствованию 18-ти месячного топливного цикла, в том числе внедрение мероприятий направленных на повышение безопасности и устойчивости в работе Балаковской АЭС, позволило обеспечить устойчивую и надежную работу персонала и оборудования энергоблоков АЭС и завершить 2013 год с показателями по выработке электроэнергии – 33,667 млрд. кВт часов.

КИУМ в 2013 году составил (средний КИУМ по станции) 96,2%;

КГОТ в 2013 году составил 96,97 %

Технико-экономические показатели АЭС при переходе на 18-ти месячный топливный цикл. Основные характеристики и показатели эффективности стационарных топливных циклов для ВВЭР-1000

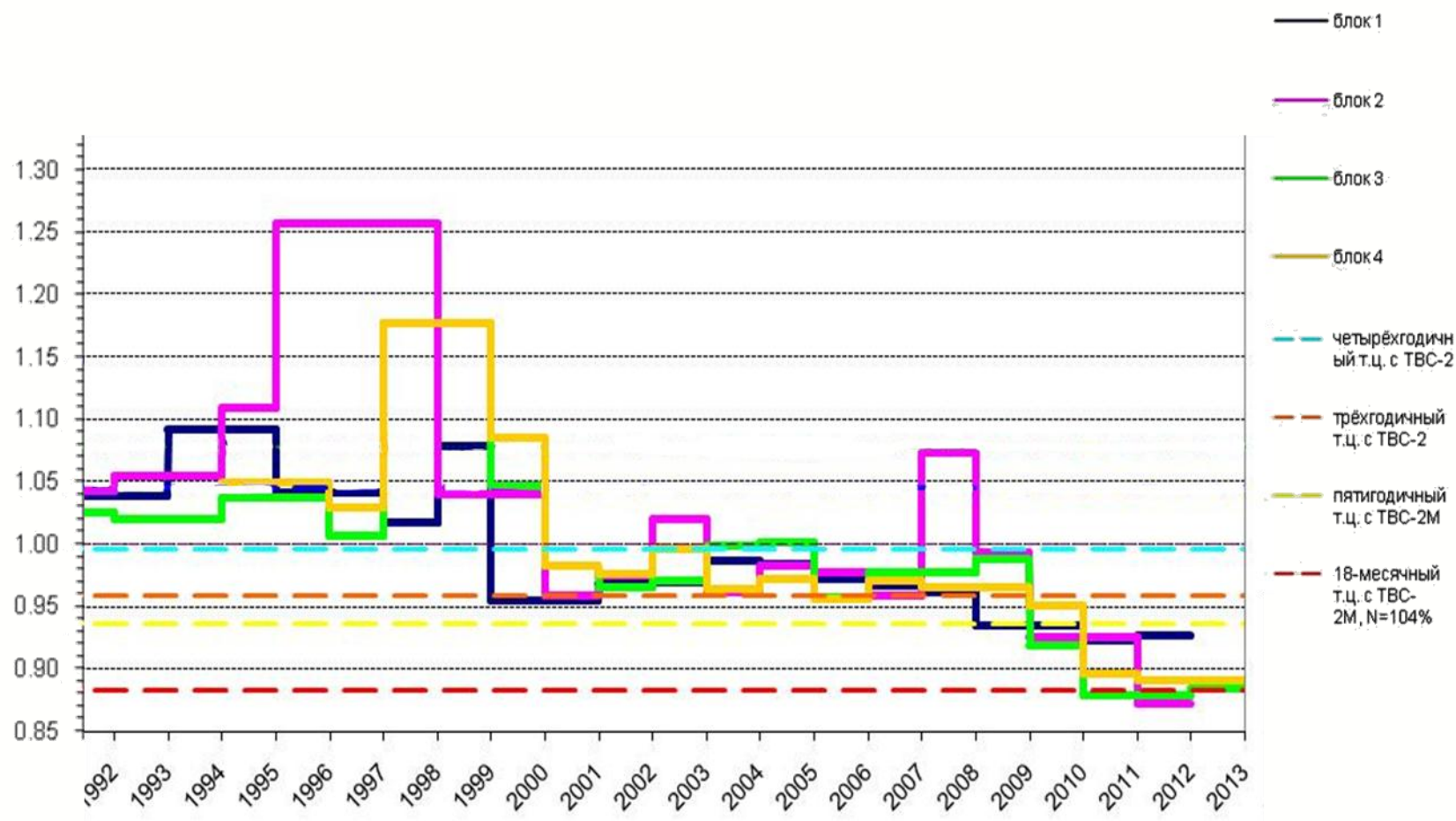


РОСЭНЕРГОАТОМ
БАЛАКОВСКАЯ
АЭС

Топливные циклы	Кол-во ТВС подпитки, шт.	Среднее обогащ. топлива подпитки, %	Длительность кампании, эфф.сут.	Среднее/максим. выгорание выгруз. топлива, МВт·сут/кгU	Удельный расход природного урана, кгU/МВт·сут	ТСС, отн. ед.	Относительная себестоимость электроэнергии, отн. ед.	КИУМ, %
трёх-четырёхгодичный проект УТВС с УГТ для блока № 1 Ростовской АЭС (базовый)	48/49	3,77	286	41,4/43,4	0,170	0,263	1,000	81,0
четырёхгодичный проект с ТВС-2 для блоков Балаковской АЭС	42/43	4,26	293	48,4/51,5	0,168	0,275	0,997	81,4
трёхгодичный проект с ТВС-2 для блоков Балаковской АЭС	54/55	4,25	355	45,5/49,3	0,174	0,294	0,959	84,1
пятигодичный т.ц. с ТВС-2М	36	4,83	324	58,5/61,0	0,155	0,255	0,936	82,9
18-месячный т.ц. с ТВС-2М N=104%	67	4,73	512	49,5/56,5	0,178	0,294	0,883	91,4

Примечание: приведены данные из Технического отчета. Анализ эффективности топливоиспользования на энергоблоках АЭС с ВВЭР (ВНИИАЭС инв. №О-311-236/13)

Изменение относительной себестоимости электроэнергии по годам



Примечание: приведены данные из Технического отчета. Анализ эффективности топливоиспользования на энергоблоках АЭС с ВВЭР (ВНИИАЭС инв. №О-311-236/13)



При выполнении анализа влияния стоимости ядерного топлива на экономические показатели сделаны следующие допущения:

- 1) Все блоки эксплуатируются в стационарных 12-ти месячных или 18-ти месячных топливных циклах
- 2) Продолжительности ремонтов приняты: средний ремонт 32 суток, капитальный ремонт 45 суток
- 3) Периодичность ремонтов: при работе в 12-ти месячном топливном цикле С-С-С-К, при работе в 18-ти месячном топливном цикле С-С-К (один капитальный ремонт раз в четыре года)
- 4) Затраты на средний ремонт одного блока приняты равными затратам на средний ремонт одного блока в 2013 году, затраты на капитальный ремонт приняты равными затратам на капитальный ремонт блока в 2013 году
- 5) Использовались цены 2013 года на свежее ЯТ и на вывоз ОЯТ

Технико-экономические показатели АЭС при переходе на 18-ти месячный топливный цикл

Фактический график ППР энергоблоков Балаковской АЭС с учетом ПСЭ

Год	Зима			Лето										Зима		КИУМ %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
2010		Блок 1					Блок 4			Блок 3					90,5	
2011		Блок 2						Блок 1					Блок 4		92,5	
2012		Блок 3						Блок 2					Блок 1		90,1	
2013					Блок 4			Блок 3							96,2	
2014	Блок 2						Блок 1					Блок 4			Блок 3	86,1
2015	Блок 3								Блок 2				Блок 1			91,1
2016					Блок 4				Блок 3						Блок 2	87,0
2017	Блок 2				Блок 1							Блок 4				91,2

Совмещение ремонтов отсутствует

Технико-экономические показатели АЭС при переходе на 18-ти месячный топливный цикл

Вариант организации ремонтов в 18-ти месячном топливном цикле. Кампании равной длительности. Два средних ремонта и один капитальный

	Зима			Лето								Зима	КИУМ , %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Год 1		Блок 1						Блок 2		Блок 3			96,2
Год 2		Блок 4						Блок 1					98,5
Год 3		Блок 2		Блок 3				Блок 4					96,2
Год 4		Блок 1						Блок 2			Блок 3		96,2
Год 5		Блок 4						Блок 1					98,5
Год 6		Блок 2		Блок 3				Блок 4					96,2
Год 7		Блок 1						Блок 2			Блок 3		96,2
Год 8		Блок 4						Блок 1					98,5
Год 9		Блок 2		Блок 3				Блок 4					96,2

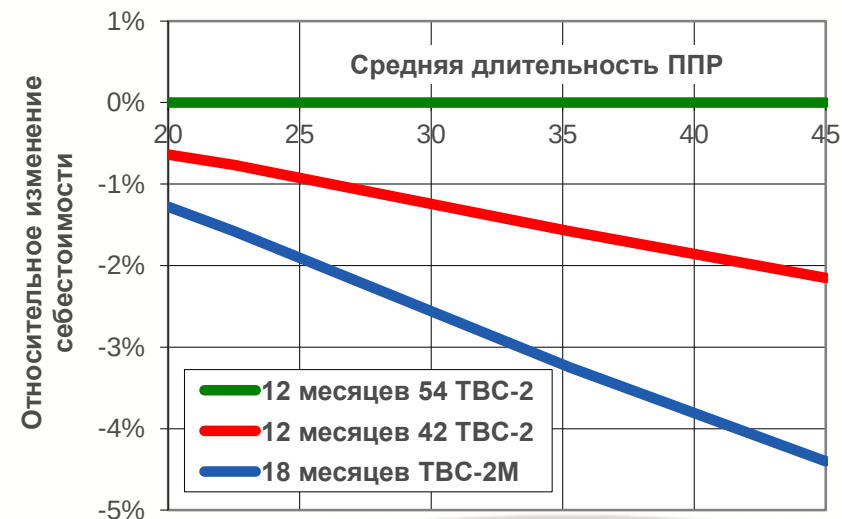
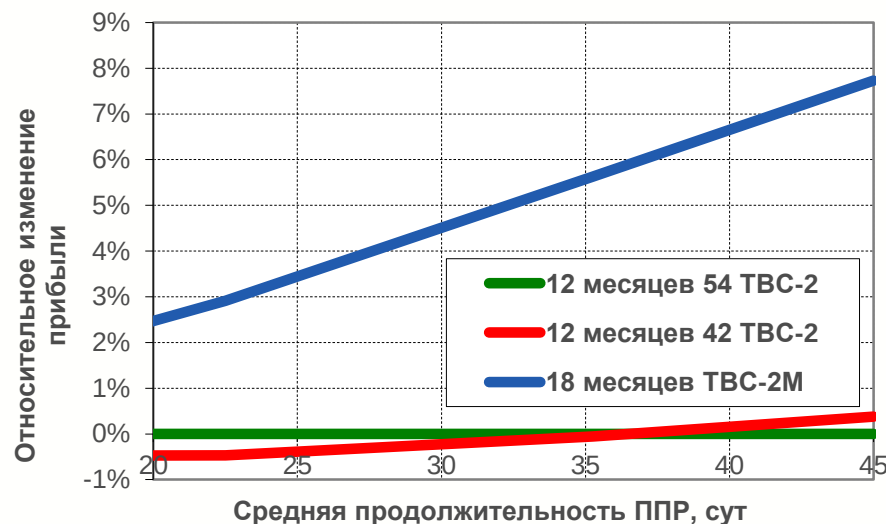
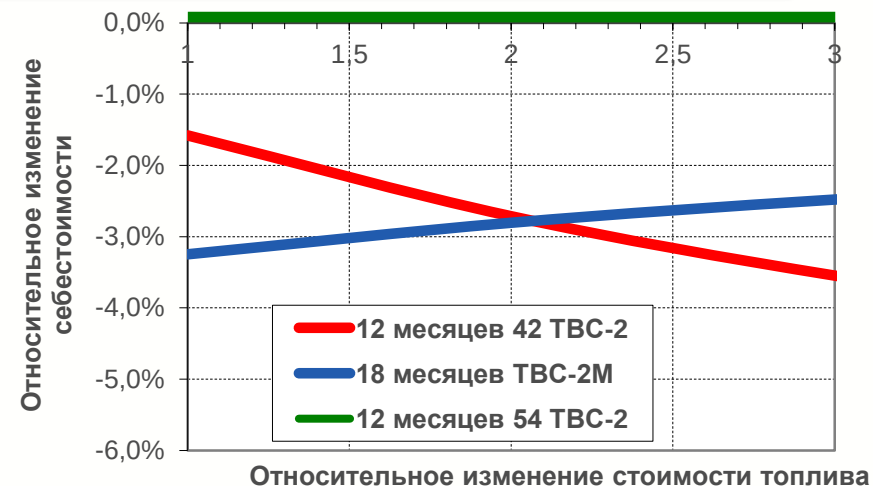
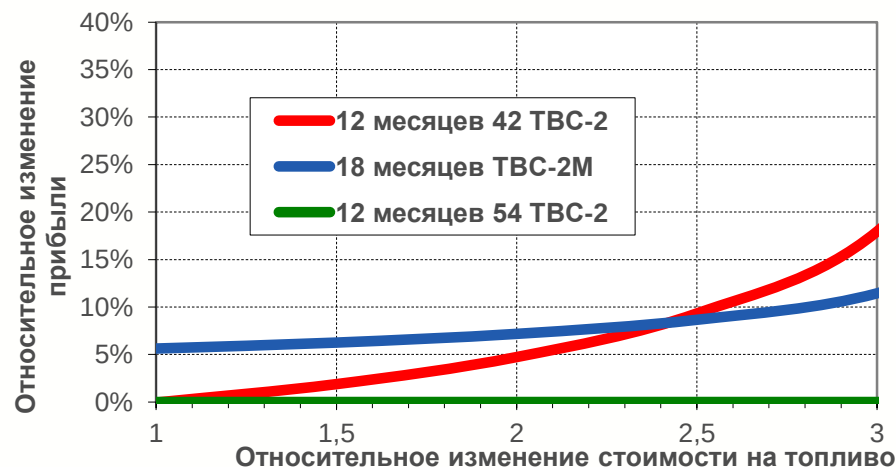
Технико-экономические показатели АЭС при переходе на 18-ти месячный топливный цикл. Сравнительные характеристики различных топливных циклов.



РОСЭНЕРГОАТОМ
БАЛАКОВСКАЯ
АЭС

Параметр	12 месяцев 54 ТВС-2 (база для сравнения)	12 месяцев 42 ТВС-2	18 месяцев 66/67 ТВС-2М
Средний вывоз ОЯТ, ТВС/год	202	180	176
Кол-во СР на один КР	3	3	2
Среднее кол-во ППР в год	3,74	4,28	2,65
Эффективная длительность кампании	355	305,8	515
Календарная длительность кампании	341	294	495
Нэл. кВт	1 040 000	1 040 000	1 040 000

Технико-экономические показатели АЭС при переходе на 18-ти месячный топливный цикл. Изменение прибыли, себестоимости э/энергии в зависимости от изменения цены на ЯТ и длительности ППР)



- Начиная с 2006 года продолжительность межремонтных циклов энергоблоков Балаковской АЭС растёт. В настоящее время Балаковская АЭС работает в топливных циклах с длительностью кампаний до 510 эфф суток
- Эксплуатация энергоблоков в 18 месячном топливном цикле позволяет управлять ремонтной кампанией в течение года, в частности проводить длительные ППР с модернизацией оборудования под ПСЭ без совмещения ремонтов на разных энергоблоках.
- Опытная эксплуатация подтверждает работоспособность, оборудования, ПУ, систем локализации аварий и трубопроводов энергоблоков в увеличенных межремонтных циклах
- Факторов, свидетельствующих о снижении надежности других проверяемых элементов (включая ПА и элементы СЛА) из-за увеличения периода проверки, не обнаружено
- Работоспособность ЯТ в увеличенных топливных кампаниях подтверждается. Работы, проводимые на Балаковской АЭС в части совершенствования ЯТ, обеспечивают безопасную и надёжную эксплуатацию энергоблоков в 18-месячном топливном цикле
- Оценка технико-экономических показателей показывают целесообразность 18 месячного топливного цикла на энергоблоках Балаковской АЭС
- Необходимо продолжить опытную эксплуатацию и обеспечить корректировку норм и правил с учетом необходимости перевода энергоблоков Бал АЭС в промышленную эксплуатацию в увеличенных межремонтных циклах